
Štúdia vplyvu medziadaptéra na dynamické zaťaženie nosnej konštrukcie plošinového vozňa

Alyona Lovska, prof. Ing., Dr.Sc. Tech.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: alyona.lovska@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2660

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2550

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2560

Vadym Ishchuk, Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina.
E-mail: vadym.ishchuk@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2563

Study of the influence of the intermediate adapter on the dynamic load of the support structure of the platform wagon

Abstract: In order to reduce the dynamic load of the platform wagon, it is proposed to use an intermediate adapter between the frame and the load. The reduction of dynamic loads is carried out due to the dissipative forces that arise in the adapter when the wagon bounces. The results of mathematical modeling of the vertical loading of the platform wagon are given, taking into account the proposed solution. It was established that the accelerations acting on the supporting structure of the platform wagon are reduced by 8.5 % compared to the typical one. The acceleration acting on the load placed on the frame of the platform wagon is 11.8 % lower than that acting on it, taking into account the typical load perception scheme. The peculiarities of determining the strength of the adapter under its vertical load are highlighted. The conducted research will contribute to the creation of developments in the design of modern structures of railway vehicles.

Keywords: platform wagon, vertical load, load modelling, wagon dynamics indicators, cargo safety.

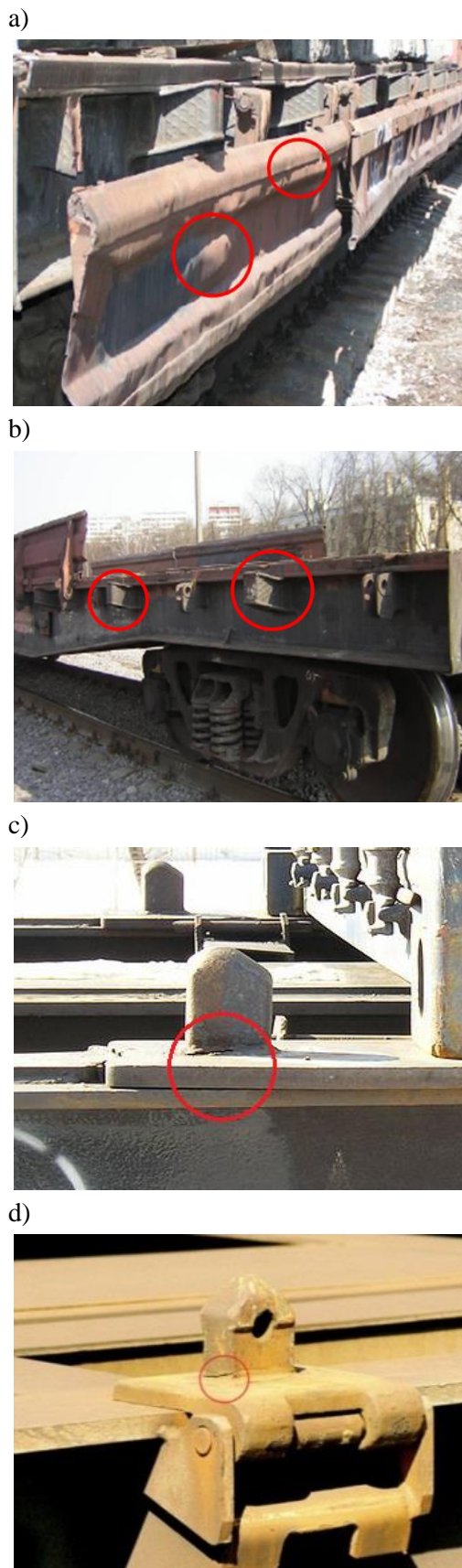
ÚVOD

Konkurenčný boj na trhu dopravných služieb vyvoláva potrebu zefektívniť prevádzkovanie železničnej dopravy pre udržanie si vedúcich pozícií. Je známe, že jedným z kľúčových aspektov prepravy tovaru po železnici je zaistenie jeho bezpečnosti.

V súčasnosti sú jedným z najpoužívanejších vozňov v medzinárodnej doprave plošinové vozne. Pri preprave nákladu plošinovými vozňami sú ich nosné konštrukcie vystavené konštantnému cyklickému zaťaženiu. V tejto súvislosti môže dôjsť k

poškodeniu ich nosných konštrukcií (obr. 1), ako aj bremien, najmä ak nie sú bezpečne upevnené. Takáto okolnosť si vyžaduje kompenzáciu zodpovedajúcich strát vlastníkom nákladu. Preto je účelné realizovať riešenia zamerané na zníženie dynamického zaťaženia tovaru pri železničnej preprave zlepšením nosných konštrukcií vozňov.

Analýza najnovších štúdií venovaných zlepšovaniu nákladných vozňov s cieľom znížiť vplyv dynamického zaťaženia na nosné konštrukcie nám umožnila vyvodiť záver o ich relevantnosti.



Obr. 1. Poškodenie nosných konštrukcií plošinových vozňov: a) deformácia bočných stien, b) deformácia upevňovacích prvkov, c, d) praskliny v dorazoch trňov

Napríklad v publikácii [1] je vykonaná štúdia vplyvu funkčne odstupňovaných komôrkových sendvičových panelov na nosnú konštrukciu vozňa.

Uvádajú sa výsledky testovania vylepšenej konštrukcie vozňa. Je dokázané, že táto implementácia je účelná. Je však dôležité povedať, že autori neskúmali problematiku dynamického zaťaženia vozňa, keďže táto realizácia bola navrhnutá s cieľom znížiť jeho vlastnú hmotnosť.

V práci [2] bolo navrhnuté riešenie na zníženie zaťaženia nosnej konštrukcie vozňa zavedením materiálu pohlcujúceho energiu do jeho komponentov. Zároveň sa predpokladá, že všetky nosné prvky konštrukcie skrine sú vyrobené z kruhových rúr. Implementácia takéhoto riešenia je však v praxi dosť náročná a vyžaduje vytvorenie vhodného systému údržby na udržiavanie vozňa v prevádzkyschopnom stave.

Za účelom zníženia zaťaženia skrine bolo v [3] navrhnuté riešenie na zvýšenie momentu odporu jeho komponentov. Dosahuje sa to zavedením viacvrstvových komponentov do konštrukcie skrine. Zároveň bol ako prototyp vybraný cisternový vozeň. Nebola ale skúmaná účinnosť tohto riešenia pre plošinové vozne.

Vlastnosti zaťaženia železničného vozňa komponentmi vyrobenými z kompozitného materiálu sú uvedené v článku [4]. Identifikujú sa hlavné nedostatky a výhody takejto implementácie, ako aj perspektívy jej ďalšieho rozvoja. Takéto zlepšenie si však vyžaduje značné kapitálové investície, čo obmedzuje množstvo jeho implementácie.

V práci [5] sa uvažuje o vhodnosti použitia panelov z kompozitných materiálov v nákladných vozňoch. Prezentované sú výsledky testov odolnosti kompozitných panelov. Je uvedený spôsob testovania panelov. Takáto modernizácia však neprispieva k zvýšeniu pevnosti rámu vozňa ako najviac zaťažovanej konštrukčnej jednotky v prevádzke.

Opatrenia na zníženie dynamického zaťaženia nosnej konštrukcie plošinového vozňa sú navrhnuté v publikácii [6]. Predpokladá sa, že ako podlaha budú použité sendvičové panely. Výsledky matematického modelovania dynamiky plošinového vozňa pri pohybe v prázdnom a naloženom stave po železničnej trati potvrdili realizovateľnosť takéhoto rozhodnutia. Táto realizácia zároveň nie je efektívna z hľadiska sériového využitia, nakoľko si vyžaduje dodatočné kapitálové investície na výrobu alebo modernizáciu vozňov.

Vykonaný prehľad literatúry dokazuje účelnosť výskumu znižovania nosných konštrukcií plošinových vozňov pre zaistenie bezpečnosti prepravovaného tovaru.

V tejto súvislosti je cieľom štúdie preskúmať vplyv medziadaptéra na dynamické zaťaženie nosnej konštrukcie plošinového vozňa.

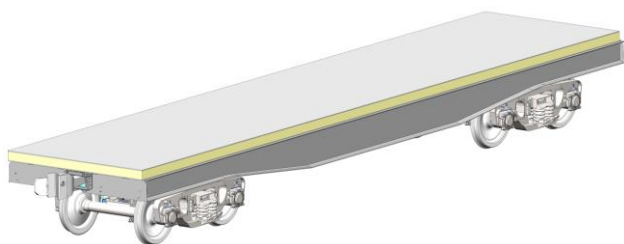
Na dosiahnutie tohto cieľa sú stanovené nasledujúce úlohy:

- určenie dynamického zaťaženia plošinového vozňa s medziadaptérom na umiestnenie nákladu,
- výpočet sily stredného adaptéra.

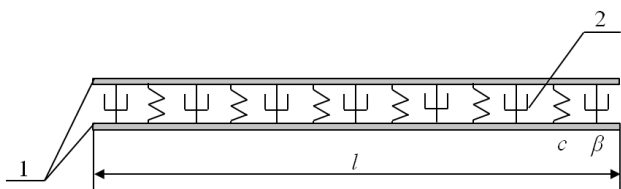
2 METODOLÓGIA

Na zníženie vplyvu vertikálnych dynamických zaťažení na nosnú konštrukciu plošinového vozňa, ako aj na zaistenie bezpečnosti na ňom prepravovaného nákladu, sa navrhuje použitie medziadaptéra (obr. 2).

Zvláštnosťou adaptéra je, že pozostáva z dvoch kovových platní, medzi ktorými je materiál absorbujúci energiu s elasticko-viskóznou charakteristikou (obr. 3). Použitie adaptéra medzi rámom vozňa a nákladom prispieje k absorpcii zvislých dynamických zaťažení, ktoré vznikajú pri kmitaní a pôsobení dynamického zaťaženia a zníži ich vplyv na náklad.



Obr. 2. Umiestnenie medziadaptéra na plošinovom vozni



Obr. 3. Konštrukčná schéma medziadaptéra: 1 - plechy, 2 - materiál s vlastnosťami absorbujúcimi energiu

Je potrebné povedať, že tento adaptér bude fungovať ako odnímateľný modul, ktorý nevyžaduje významnú zmenu nosných konštrukcií plošinových vozňov.

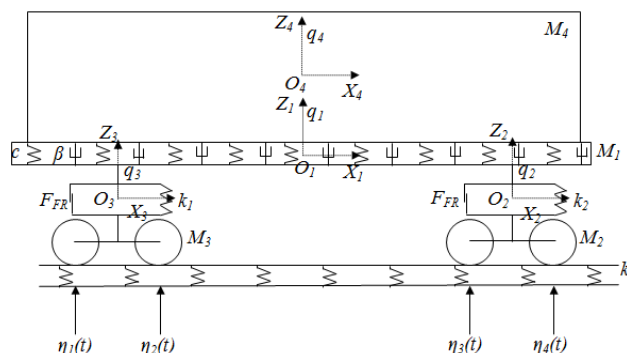
Na zdôvodnenie navrhovaného riešenia bolo vykonané matematické modelovanie dynamického zaťaženia plošinového vozňa vo vertikálnej rovine [6]. Štúdiá bola vykonaná na príklade plošinového vozňa, model 13-401 (obr. 4).

Schéma výpočtu plošinového vozňa je znázornená na obr. 5. Berie sa do úvahy, že plošinový vozeň pozostáva zo štyroch nadstavieb: rámu, dvoch vozíkov (model 18-100) a nákladu umiestneného na ráme. Náklad sa považuje za podmienený využitím plnej užitočnej nosnosti plošinového vozňa (70 ton).

Predpokladá sa, že plošinový vozeň sa pohybuje po železničnej trati, ktorá má elastické charakteristiky [6, 7].



Obr. 4. Plošinový vozeň, model 13-401



Obr. 5. Schéma výpočtu plošinového vozňa

Sústava diferenciálnych rovníc pohybu plošinového vozňa má tvar:

$$\begin{cases} M_1 \cdot \ddot{q}_1 + C_{1,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{1,2} \cdot \dot{q}_2 + C_{1,3} \cdot \dot{q}_3 = \\ -F_{FR} \cdot \left(\text{sign}(\dot{\delta}_1) + \text{sign}(\dot{\delta}_2) \right) - \\ -c \cdot (q_1 - q_4) + \beta \cdot (\dot{q}_1 - \dot{q}_4), \\ M_2 \cdot \ddot{q}_2 + C_{2,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{2,2} \cdot \dot{q}_2 + B_{2,2} \cdot \dot{q}_2 = \\ = F_{FR} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_1) + k(\eta_1 + \eta_2), \\ M_3 \cdot \ddot{q}_3 + C_{3,1} \cdot \dot{q}_1 + C_{3,3} \cdot \dot{q}_3 + B_{3,3} \cdot \dot{q}_3 = \\ = F_{FR} \cdot \text{sign}(\dot{\delta}_2) + k(\eta_3 + \eta_4), \\ M_4 \cdot \ddot{q}_4 = M_4 \cdot g - c \cdot (q_1 - q_4) + \\ + \beta \cdot (\dot{q}_1 - \dot{q}_4), \end{cases} \quad (1)$$

kde M_1 je hmotnosť nosnej konštrukcie plošinového vozňa,

M_2, M_3 - hmotnosť podvozkov,

S_{ij} sú charakteristiky pružnosti prvkov kyvného systému, ktoré sú určené koeficientmi tuhosti pružín pruženia k_T ,

k - tuhosť trate,

B_{ij} - disipatívne súčinitele,

F_{FR} - trecia sila v zostave pružiny podvozka,

δ_i - deformácie pružných prvkov pruženia,

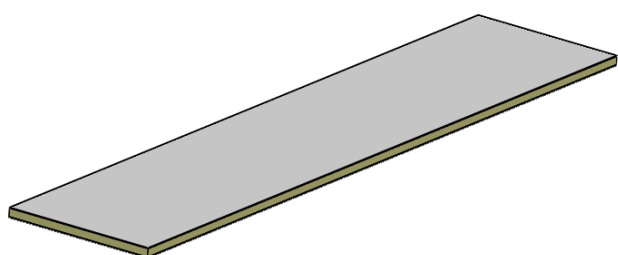
$\eta_i(t)$ - nerovnosť trate,

c - súčiniteľ tuhosti materiálu absorbujúceho energiu,

β - súčiniteľ viskózneho odporu materiálu absorbujúceho energiu.

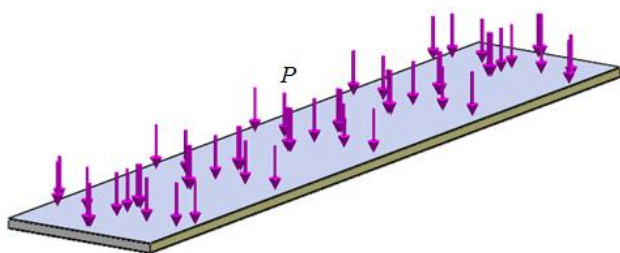
Riešenie sústavy diferenciálnych pohybových rovníc bolo realizované v softvéri *MathCad* [8, 9]. V tomto prípade sú začiatočné podmienky nastavené na nulu.

Výsledná hodnota zrýchlenia sa berie do úvahy pri výpočte pevnosti medziadaptéra. Na tento účel bol vytvorený jej priestorový model v programe *SolidWorks* [10, 11] (obr. 6). Berie sa do úvahy, že dĺžka adaptéra je $l = 13,3$ m a šírka je $b = 2,77$ m. To znamená, že hlavné geometrické parametre medziadaptéra sa rovnajú zodpovedajúcim parametrom rámu plošinového vozňa. Súčasne bola hrúbka plechov medziadaptéra určená *Bubnov-Galyorkinovou metódou* a bola asi 12 mm.

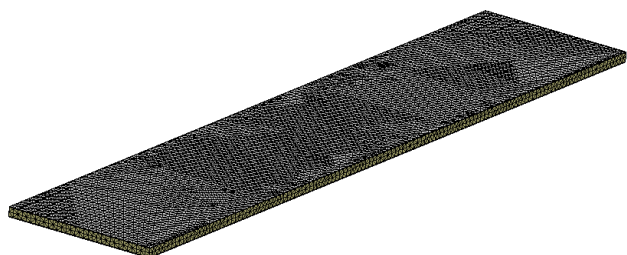


Obr. 6. Priestorový model medziadaptéra

Penový hliník sa používa ako materiál absorbujúci energiu. Výpočet pevnosti bol vykonaný metódou konečných prvkov v programe *SolidWorks Simulation*. Berie sa do úvahy, že plechy tvoriace adaptér sú vyrobené z ocele 09G2S. Upevnenie adaptéra sa uskutočnilo na vonkajšom povrchu spodnej platne. Súčasne sa aplikuje pevné upevnenie. Na vonkajší plech pôsobilo rovnomerne rozložené zaťaženie P (obr. 7).



Obr. 7. Schéma výpočtu medziadaptéra



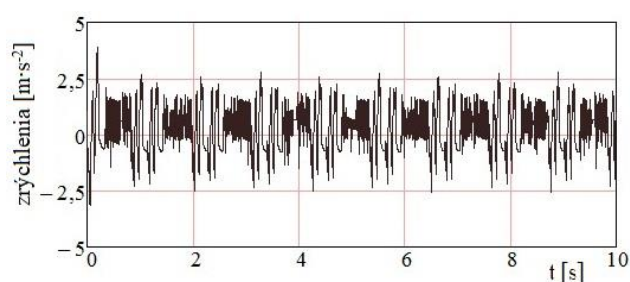
Obr. 8. Model konečných prvkov adaptéra

Model konečných prvkov adaptéra tvoria priestorové štvorsteny (obr. 8). Ich optimálny počet sa stanoví

graficko-analytickou metódou. Počet uzlov modelu bol 20 408 a počet prvkov bol 94 893.

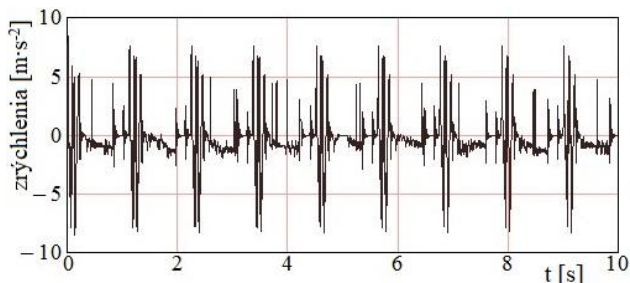
3 VÝSLEDKY

Výsledky stanovenia hlavných ukazovateľov dynamiky plošinového vozňa v stave pohybu v zaťaženom stave s klbovou nerovnosťou sú na obr. 9 až obr. 11. Zistilo sa, že maximálne zrýchlenia pôsobiace v ťažisku nosnej konštrukcie plošinového vozňa nastávajú v momente prejazdu nerovností na koľajnici a dosahujú hodnotu $3,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (obr. 9). Pri nasledujúcom oscilačnom procese sa hodnota zrýchlenia znižuje a dosahuje $2,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. S prihliadnutím na navrhované riešenie je teda zrýchlenie pôsobiace na nosnú konštrukciu plošinového vozňa znížené o 8,5 % oproti typickému.



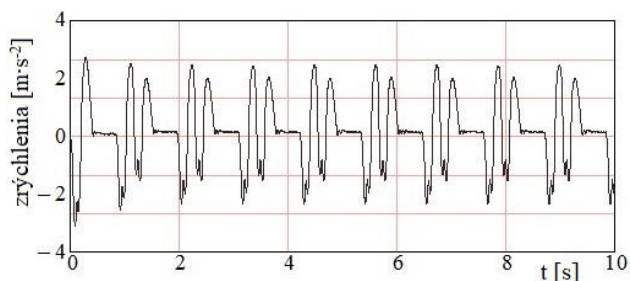
Obr. 9. Zrýchlenie plošinového vozňa v ťažisku

Zrýchlenie pôsobiace na vozíky je znázornené na obr. 10. Číselná hodnota zrýchlenia je asi $9,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.



Obr. 10. Zrýchlenie pôsobiace na podvozky

Zrýchlenie pôsobiace na zaťaženie umiestnené na ráme plošinového vozňa bolo $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ (obr. 11).

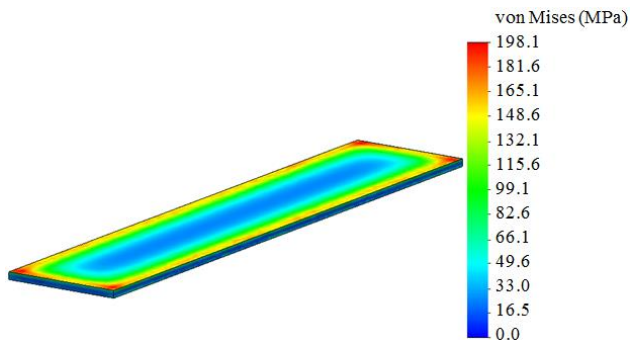


Obr. 11. Zrýchlenie pôsobiace na náklad

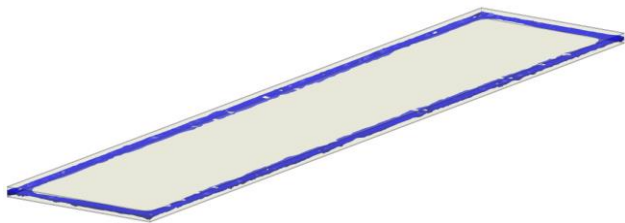
Výsledná hodnota zrýchlenia je o 11,8 % nižšia ako hodnota pôsobiaca na náklad, berúc do úvahy typickú schému rozloženia záťaženia.

V ďalšej fáze štúdie sa vypočítala sila medziadaptéra. Výsledky výpočtu sú znázornené na

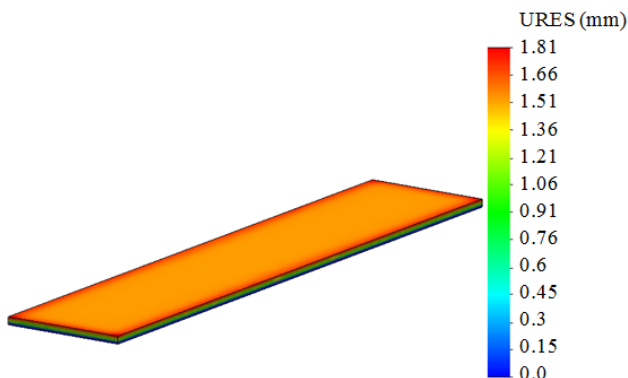
obr. 12 až obr. 14. Maximálne napätia zaznamenané v rohových častiach adaptéra sú 198,1 MPa (obr. 12). Uvedená hodnota napätí nepresahuje prípustnú hodnotu, ktorá je 210 MPa [12]. Preto je pevnosť adaptéra zachovaná. Najviac zaťažené oblasti adaptéra sú znázornené na obr. 13. Sú označené modrou farbou. Maximálne priehyby boli detekované v hornom plechu adaptéra a dosahujú 1,81 mm (obr. 14).



Obr. 12. Rozloženie napätí v konštrukcii medziadaptéra



Obr. 13. Najviac zaťažené oblasti medziadaptéra



Obr. 14. Priehyby v uzloch adaptéra

Ďalším vývojom tejto štúdie je zváženie otázok spojených s upevnením adaptéra na rám plošinového vozňa. Ďalej je možné skúmať možnosti využitia zvaraných materiálov na výrobu navrhutej konštrukcie [13, 14] a tiež prípadnú aplikáciu materiálov s nižšou mernou hmotnosťou pre dosiahnutie zníženia hmotnosti navrhutej konštrukcie [15].

ZÁVER

Obsahom prezentovaného príspevku bolo určenie dynamického zaťaženia plošinového vozňa s medziadaptérom na umiestnenie nákladu. Zistilo sa, že maximálne zrýchlenia, ktoré pôsobia v ťažisku nosnej konštrukcie plošinového vozňa pri pohybe v prázdnom stave, nastávajú v momente prejazdu

nerovnosti na koľajnici a dosahujú hodnotu $3,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. S prihliadnutím na navrhované riešenie je teda zrýchlenie pôsobiace na nosnú konštrukciu plošinového vozňa znížené o 8,5 % oproti typickému. Zrýchlenie pôsobiace na vozíky bolo asi $9,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Zrýchlenie pôsobiace na zaťaženie umiestnené na ráme plošinového vozňa bolo $2,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Výsledná hodnota zrýchlenia je o 11,8 % nižšia ako hodnota pôsobiaca na záťaž, berúc do úvahy typickú schému vnímania záťaže.

Vykonaný výpočet pevnosti medziadaptéra. Maximálne napätia boli zaznamenané v jeho rohových častiach a dosiahli hodnotu 198,1 MPa, čo je o 5,7 % menej ako prípustná úroveň. Preto je pevnosť adaptéra zachovaná. Maximálne pohyby sa uskutočňujú v hornom plechu adaptéra a dosiahli hodnotu 1,81 mm.

Realizovaný výskum prispeje k vytvoreniu vývoja v oblasti navrhovania moderných konštrukcií koľajových vozidiel.

POĎAKOVANIE

„Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V01-00131.“

Táto práca vznikla vďaka podpore projektu KEGA 031ŽU-4/2023: Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného program Vozidlá a motory.

LITERATÚRA

- [1] AL-SUKHON, A. - ELSAYED, M. S. (2021): *Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels*. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit, 236(8).
- [2] FOMIN, O. - GORBUNOV, M. - LOVSKA, A. - GERLICI, J. - KRAVCHENKO, K. (2021): *Dynamics and strength of circular tube open wagons with aluminum foam filled center sills*. In: Materials, 14(8), 1915.
- [3] JEONG, D. - TYRELL, D. - CAROLAN, M. - PERLMAN, A. B. (2009): *Improved Tank Car Design Development: Ongoing Studies on Sandwich Structures*. In: Proceedings of ASME Joint Rail Conference, March 3-5, Pueblo, Colorado, USA, pp. 1-10.
- [4] STREET, G. E. - MISTRY, P. J. - JOHNSON, M. S. (2021): *Impact Resistance of Fibre Reinforced Composite Railway Freight Tank Wagons*. In: J. Compos. Sci. 5, 152.
- [5] WRÓBEL, A. - PŁACZEK, M. - BUCHACZ, A. (2017): *An Endurance Test of Composite Panels*. In: Solid State Phenomena. 260, pp. 241-248.

- [6] LOVSKA, A. - NERUBATSKYI, V. - OKOROKOV, A. - VERNYHORA, R. - ZHURAVEL, I. (2023): *Determining loading patterns in the bearing structure of a railroad flatcar with a floor made from sandwich panels*. In: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/7 (123), pp. 6-13.
- [7] DOMIN, Y. V. - CHERNIAK, G. Y. (2003): *Fundamentals of wagon dynamics: a study guide* (In Ukrainian). Kyiv: KUETT, 269 p.
- [8] ZADACHIN, V. M. - KONIUSHENKO, I. H. (2014): *Numerical methods: tutorial* (in Ukrainian). Kharkov, 180 p.
- [9] HOI, T. P. - MAKHNEI, O. V. (2012): *Differential equations: a study guide* (In Ukrainian). Ivano-Frankivsk, 352 p.
- [10] KOZIAR, M. M. - FESHCHUK, YU. V. - PARFENIUK, O. V. (2018): *Kompiuterna hrafika: SolidWorks: Navchalnyi posibnyk*. Kherson: Oldi-plyus, 252 s.
- [11] PUSTIULHA, S. I. - SAMOSTIAN, V. R. - KLAKE YU. V. (2018): *Inzhenerna hrafika v SolidWorks: Navchalnyi posibnyk*. Lutsk: Vezha, 172 s.
- [12] DSTU 7598:2014 (2015): *Vantage carriages. For the first time to rebuild and design new and modernized cars with a gauge of 1520 mm (non-self-propelled)*. Kiev, 250 s.
- [13] UDVORKA, A. - BLATNICKÝ, M. - KOPAS, P. (2009): *Stress analysis of specimens for multiaxial fatigue testing*. In: TRANSCOM: 8-th European conference of young research and scientific workers. Žilina, June 22-24, Slovak Republic, pp. 135-138, ISBN 978-80-554-0031-0.
- [14] JAKUBOVIČOVÁ, L. - KOPAS, P. - BLATNICKÝ, M. (2011): *Strain and residual stress determinations of the welded specimen using FEM software*. In: Machine modeling and simulations. Trenčín: Faculty of industrial technologies, University of Alexander Dubček in Trenčín, pp. 57-64, ISBN 978-80-8075-494-5.
- [15] BLATNICKÝ, M. - BARTA, D. (2012): *Testing of lightweight construction materials of the transport means*. In: Logi: scientific journal on transport and logistics, Vol. 3, No. 1, pp. 23-35, ISSN 1804-3216.